

线推扫式高光谱相机侧扫成像几何校正

王书民¹, 张爱武¹, 胡少兴², 孙卫东³, 孟宪刚¹, 赵文吉¹

(1. 首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048;

2. 北京航空航天大学 机械及自动化学院, 北京 100083; 3. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘要: 线阵高光谱相机侧扫成像可以有效解决卫星遥感影像无法获取建筑物立面光谱数据等问题。阐述了课题组集成开发的线推扫式高光谱遥感监测系统组成部分及关键技术指标等; 根据地面侧扫成像特点, 详细推导了适合于线推扫式相机地面侧扫成像几何校正模型; 给出了地理参考影像格网划分和重采样方法, 并对数据采集过程可能出现的漏采现象提出解决方案。通过大量地面模拟实验, 验证了线阵影像几何畸变校正算法的有效性及其鲁棒性, 为同类产品的地面应用提供参考。

关键词: 线推扫式; 侧扫成像; 几何校正

中图分类号: P237 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)02-0579-07

Geometric correction of linear push-broom hyperspectral camera side-scan imaging

Wang Shumin¹, Zhang Aiwu¹, Hu Shaoxing², Sun Weidong³, Meng Xiangang¹, Zhao Wenji¹

(1. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. College of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The side-scan imaging of the linear push-broom hyperspectral camera could solve the problem that the remote sensing images collected from the satellite platform could not get the spectral data of building facades. The main components and the key technical specifications of linear push-broom hyperspectral remote sensing system integrated and developed by our research team were stated in this paper. According to the feature of side-scan imaging, the geometric correction model was derivated in detail, which was suitable to the linear camera side-scan imaging. The methods of geo-referenced image divided into grids and spectral resampling were presented, and the solution for data loss in the collection process was also proposed. The validity and robustness of linear image distortion correction algorithm were verified through amounts of simulation experiments. It provided reference for the application of similar products.

Key words: linear push-broom; side-scan imaging; geometric correction

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-25

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAH31B01); 国家自然科学基金项目(41071255); 北京市自然科学基金重点项目(B类)(KZ201310028035)

作者简介: 王书民(1985-), 男, 博士生, 主要从事线推扫式高光谱成像研究。Email:wmcnu@163.com

导师简介: 张爱武(1972-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事机载高光谱传感器成像研究。Email:zhangaw163@163.com

0 引言

基于卫星平台或机载平台获取的高光谱影像通常可以获取丰富的建筑物顶面信息,但是无法获取建筑物等的立面信息,线推扫式成像光谱仪的地面侧扫成像可以有效的获取建筑物等的侧面信息,为不同的应用研究提供了可靠的光谱数据。通常的做法是将成像光谱仪搭载在直线滑轨上进行平移扫描成像,通过滑轨的均匀移动获得比例缩放均匀、形变小的光谱图像,但是对于面积较大的建筑或壁画等,其要求滑轨足够长才能获得整个建筑物对象的光谱图像,这在一定程度上限制了成像光谱仪基于滑轨扫描成像的应用;参考文献[1]采用转扫式成像,即将成像光谱仪放置在可以匀速转动的转台上,通过转台的旋转带动传感器进行扫描成像,虽然在一定程度上扩大了传感器的扫描成像范围,但是转扫成像获取光谱影像存在较大的透视畸变,同时存在多个站点配准和分辨率不一致的问题。文中介绍了课题组集成开发的线推扫式高光谱成像系统,详细推导了基于直接地理参考的线阵相机侧扫成像模型,并对直接地理参考后的影像进行格网划分和光谱重采样,实现了畸变影像的校正,最后通过大量实验验证了算法的有效性和鲁棒性,为同类产品的地面侧扫成像应用提供了参考。

1 线推扫式高光谱成像系统概述

课题组集成开发的线推扫式高光谱成像系统主要选用了芬兰 Specim 公司的线阵高光谱相机(<http://www.specim.fi/>)与加拿大 NovAtel 公司的位置姿态测量系统(Position and Orientation System, POS)Span CPT (<http://www.novatel.com/>),其详细性能参数见表 1 与表 2,通过中央控制单元来控制高光谱线阵影像与位置姿态数据的同步采集,其严格同步方式可以通过中央控制计算机的高性能计数器(High Performance Counter)来实现,即中央处理单元同时记录单帧影像的采集时间和单帧影像所对应空间位置和姿态角的采集时间,通过最近邻搜索匹配的方式实现数据的融合,线阵影像与 POS 配准的具体方法见参考文献[2],通过实际测试其时间同步可以达到微秒级的精度,满足线推扫式成像及测图的精度

要求。由于 POS 系统获取传感器的空间位置姿态变化,并根据欧拉变换计算单帧影像的外方位元素,因此,位置姿态传感器必须与线阵高光谱相机呈刚性固连安装在运动载体上,如图 1 所示,其推扫成像方向与小车平台前进方向垂直,即进行水平方向上推扫,竖直方向上成像。

表 1 线推扫式高光谱相机的详细参数

Tab.1 Specification of linear push-broom hyperspectral camera

Parameter name	Value
Nominal spectral range	400–1 000 nm
Spectral resolution	2.73 nm
Pixel size	6.6 μm (spectral) \times 8.8 μm (spatial)
Slit size	30 μm
Sensor type	11.84 \times 8.88 mm–1 600 \times 1 200 pixels
Focal length	23 mm

表 2 位置姿态测量系统的详细参数

Tab.2 Specification of position and orientation system

Parameter name	Value
GPS measurement rate	5 Hz
IMU measurement rate	100 Hz
GPS time accuracy	20 ns RMS
Position accuracy	0.02 m
RMS Horizontal	0.05 m
Vertical	
Attitude accuracy	0.015°
RMS Roll Pitch	0.015°
Heading	0.05°

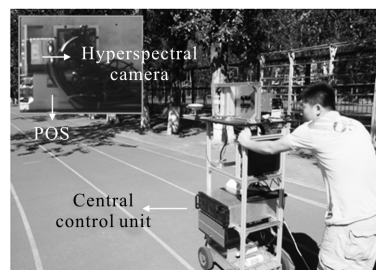


图 1 线推扫式高光谱相机和 POS 安装在运动平台上进行推扫成像

Fig.1 Push-broom hyperspectral camera and POS are mounted on the mobile platform

2 地面侧扫构像模型

在侧扫成像过程中,由于路面的不平整性,导致线推扫式高光谱相机不能按照理想条件下传感器一直处于水平状态进行推扫,造成相邻帧之间存在严

重的扭曲畸变,严重影响后期的定位与分析,因此,必须对线推扫式高光谱影像进行畸变校正。常见的算法有:基于有理函数模型线阵影像校正算法^[3-5],适用于大多数传感器,但是有理函数模型计算复杂,通常由于参量过多而导致解的不稳定性,且模型系数没有具体物理意义,校正精度存在一定不准确性。基于一般多项式的影像校正算法^[4,6-7],算法解算稳定,形式简单,在实际中利用率较高,适用于多种传感器。上述模型一般适用于线阵卫星影像的校正,且需要大量地面控制点解算模型参数,对于平台受气流影响严重且幅面小的机载线阵影像并不适用。参考文献 [8-10] 对机载线推扫式影像进行了几何校正,但是经典共线方程并不能直接应用于线推扫式相机地面侧扫成像,图2给出了线阵高光谱侧扫成像过程。

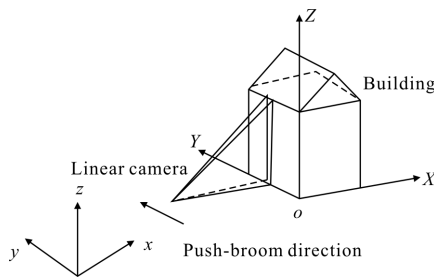


图2 线阵高光谱相机侧扫成像

Fig.2 Linear push-broom hyperspectral camera side-scan imaging

假定点 (X,Y,Z) 为,对象空间内一点, $(x,y,-f)$ 为像空间内对应点, (X_s,Y_s,Z_s) 为单帧影像的外方位线元素,

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$$

为外方位角元素构成的旋转矩阵,

则地面模拟构像方程为:

$$\begin{cases} X=X_s+(Y-Y_s)\frac{a_1x+a_2y-a_3f}{b_1x+b_2y-b_3f} \\ Z=Z_s+(Y-Y_s)\frac{c_1x+c_2y-c_3f}{b_1x+b_2y-b_3f} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y=Y_s+(X-X_s)\frac{b_1x+b_2y-b_3f}{a_1x+a_2y-a_3f} \\ Z=Z_s+(X-X_s)\frac{c_1x+c_2y-c_3f}{a_1x+a_2y-a_3f} \end{cases} \quad (2)$$

公式(1)和公式(2)为适用于线阵高光谱相机侧扫成像的共线方程,通过 POS 系统获取传感器位置姿态的变换,根据像空间到制图空间的欧拉旋转变

换,便可以获取模型求解所需的参数,从而建立对象空间与像空间之间的对应关系。其中,公式(1)XZ为平面在像空间内投影成像,公式(2)YZ为平面在像空间内投影成像。侧扫成像模型的选择与测量对象的空间方位及摄影测量坐标系的定义有关。

图3给出了建筑物在导航坐标系中的空间方位分布,对于图3(a)、(b),可以定义成图坐标系与导航

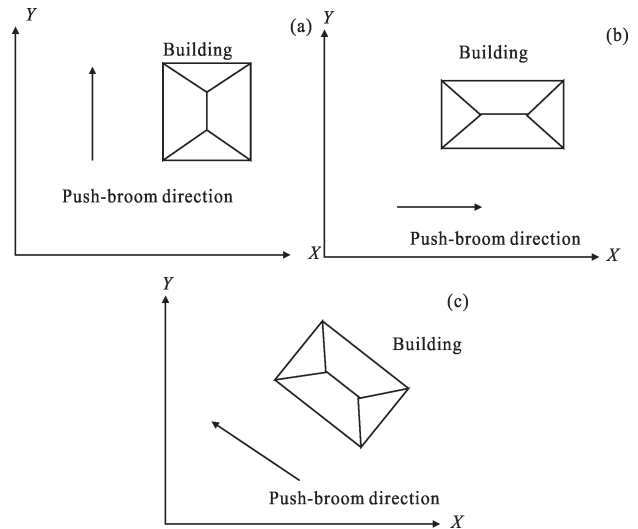


图3 建筑物在导航坐标系中的空间方位

Fig.3 Orientation of building in the navigation system

坐标系平行,其中,图3(a)为建筑物南北走向,在扫描成像中,根据公式(2)选择YZ平面投影成像;图3(b)为建筑物东西走向,其符合国内大部分建筑的空间方位分布,根据公式(1)选择XZ平面投影成像;(见图3(c))为特殊情况下建筑物分布走向,即建筑物与导航坐标系的X轴成一定的角度分布,通常情况下,其成图坐标系定义与建筑物分布走向平行,然后选XZ或YZ平面投影成像。在线推扫式高光谱地面侧扫构像中,即像空间坐标系到对象空间坐标系转换中,通常涉及以下空间坐标系:像空间坐标系(c),本体坐标系(b),导航坐标系(g),地心地固坐标系(e),成图坐标系(m),文中对于各坐标系的定义如下:

(1) 像空间坐标系(c):Y轴指向传感器推扫前进的方向,Z轴向上,X轴与传感器推扫前进的方向垂直向右,坐标原点在主光轴中心,构成右手旋转坐标系。

(2) 本体坐标系(b):Y轴指向运动载体平台前进的方向,Z轴向上,X轴与运动平台前进的方向垂直向右,坐标原点在IMU中心,构成右手旋转坐标系。

(3) 导航坐标系(g):即东北天坐标系,与参考椭球相切的局部水平坐标系,其X轴垂直于局部子午线向东,Y轴与局部子午线相切指向北,Z轴向上。

(4) 地心地固坐标系(e):固定在参考椭球上的坐标系,其原点在参考椭球的中心,X轴指向赤道与格林尼治子午线的交点,Y指向赤道与90°子午线的交点,Z轴通过北极。

(5) 成图坐标系(m):用户定义右手坐标系,其坐标轴通常与被测量对象空间坐标系平行,文中定义成图坐标系原点在测量对象左上角,X,Y,Z轴与导航坐标系坐标轴平行,且指向相同。

因此,像空间坐标系到本体坐标系的转换为 R_c^b ,本体坐标系到导航坐标系的转换为 R_b^g ,导航坐标系

到地心地固坐标系的转换为 R_g^e ,地心地固坐标系到成图坐标系的转换为 R_e^m ,由于导航坐标系与成图坐标系坐标轴平行且指向相同, $E=R_e^m R_g^e$,则:外方位角元素构成的旋转矩阵 $R=R_e^m R_g^e R_b^g R_c^b=R_b^g R_c^b$,外方位线

元素为 $\begin{vmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{vmatrix}^m = R_e^m \begin{vmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ Z-Z_0 \end{vmatrix}^e$,其中, (X_0, Y_0, Z_0) 为成图坐标系原点在

地心地固坐标系中的坐标。

$$R_c^b = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$R_b^g = \begin{vmatrix} \cos R & 0 & -\sin R \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R & 0 & \cos R \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos P & -\sin P \\ 0 & \sin P & \cos P \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos H & -\sin H & 0 \\ \sin H & \cos H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos H \cos R + \sin H \sin P \sin R & \sin H \cos P & \cos H \sin R - \sin H \sin P \cos R \\ -\sin H \cos R + \cos H \sin P \sin R & \cos H \cos P & -\sin H \sin R - \cos H \sin P \cos R \\ \cos P \sin R & \sin P & \cos P \cos P \end{vmatrix} \quad (4)$$

$$R_b^g = \begin{vmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \sin L & \cos B \sin L & \sin B \end{vmatrix} \quad (5)$$

式中: R 、 P 、 H 分别代表横滚角、俯仰角和航偏角; L 、 B 分别代表经度和纬度坐标。

3 影像格网划分及光谱采样

在进行像素坐标地理定位后,每个像素从像素坐标转换为制图坐标系下的地理坐标,因此,应根据公式(6)或(7)进行地理参考后影像格网划分:

$$\begin{aligned} x' &= (X - X_{\min}) / GSD + 1 \\ y' &= (Z - Z_{\min}) / GSD + 1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x' &= (Y - Y_{\min}) / GSD + 1 \\ y' &= (Z - Z_{\min}) / GSD + 1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: GSD 为地面采样间隔, (X, Y, Z) 为像素定位后的地理坐标, $X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min}$ 分别为像素定位后 X, Y, Z 坐标的最小值, (x', y') 为格网划分后新的像素坐标。文中考虑到重采样可能带来的光谱畸变影响,采用直接法进行畸变影像的校正,即在对每个像素进行地理定位和格网划分后,采用函数 $f'(x', y') = f(x, y)$ 直接将原始像素的光谱值赋给变换后对应像素,其中,

$f(x, y), f'(x', y')$ 分别为校正前后对应像素的光谱值。

车载移动平台的运动速度与线阵高光谱相机的数据采集速率相匹配,由于线阵传感器的采集速率有限,在影像数据采集前应详细计算单帧影像的扫描覆盖宽度,即垂直于车载平台前进方向单帧影像的覆盖宽度 w (m),其由传感器有效入射狭缝 s (μm),镜头焦距 f (mm),成像光谱仪距离地物对象的距离 d (m)等决定,如图4所示,则 w 为:

$$w = \frac{ds \times 10^{-3}}{f} \quad (8)$$

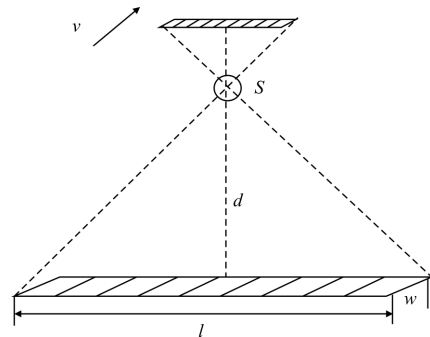


图4 推扫成像覆盖范围计算

Fig.4 Length and width of push-broom imaging coverage area

假定成像光谱采集系统的影像采集速率为 n 帧/s, 则每单位时刻(s)采集影像的地面覆盖宽度为 T : $T = nw$, 决定了车载移动平台前进的速度, 即在影像的采集过程中, 车载平台的移动速度 v (m/s) 应该满足: $v \leq T$ 。如果 $v > T$ 则可能出现影像的漏采现象, 数据出现漏洞, 即数据黑洞。对于影像数据出现的漏采现象, 在采集的过程可以通过以下方法解决: (1) 控制车载移动平台的速度小于单位时间系统采集影像的覆盖宽度; (2) 对于光谱影像数据进行选择性采集, 即特定感兴趣的光谱波段进行采集, 以降低影像数据量, 提高影像的采集帧率, 例如采集 100 多个波段; (3) 通过后期重采样, 采用双线性内插或三次卷积插值的方法从临近像元进行内插, 进行漏采区域填补, 但是当漏采区域过大, 将无法进行填充, 同时可能造成光谱失真。

4 实验与分析

文中结合 VS2008 与 OpenCV 计算机视觉库编制了线推扫式高光谱影像几何校正程序 GeoCali, 在惠普 Hpxw4600 上进行了基于移动平台侧扫成像的几何校正实验, 其主要配置为 intel 酷睿 2 处理器, 主频为 3.06 GHz, 内存大小为 4 G。

4.1 地面推扫式成像一

2012 年 10 月, 在首都师范大学南校区操场进行了推扫式高光谱成像实验, 实验共采集了 4 222 帧影像, 每帧影像 1 600 个像素, 每个像素包括 840 灰

度值。由于车载平台姿态的变化, 致使获取的影像存在严重的扭曲, 如图 5 所示, 同时由于线推扫式高光谱相机始终是处于采集状态, 即在车载平台前进缓慢或是停止不前时仍以相同的频率采集, 存在严重的“拖尾”现象, 当小车前进速度过快时, 存在影像的“挤压”现象。实验选择了距离线推扫式传感器 340 m 远的高层建筑为主要校正对象, 目标对象距传感器的距离近似相同。由于传感器是从西向东扫描成像, 即对象空间的 XZ 平面投影到成像, 所以根据公式(1)进行几何畸变校正, 耗时 3.5 h。校正后影像, 见图 6, 校正后影像保持了其原有的平直性, 效果理想, 但是由于车载移动平台在运动初期前进速度过快, 超过了线阵影像单位时间内推扫成像覆盖的宽度范围, 造成校正后图像出现黑色的条带, 即漏采现象。实验选择了 5 个特征明显的建筑物边缘顶点进行精度验证, X 方向的平均精度为 2.8 像素, Y 方向的精度



图 5 基于车载移动平台采集的原始高光谱线阵影像
Fig.5 Raw hyperspectral image is captured based on the mobile vehicle platform

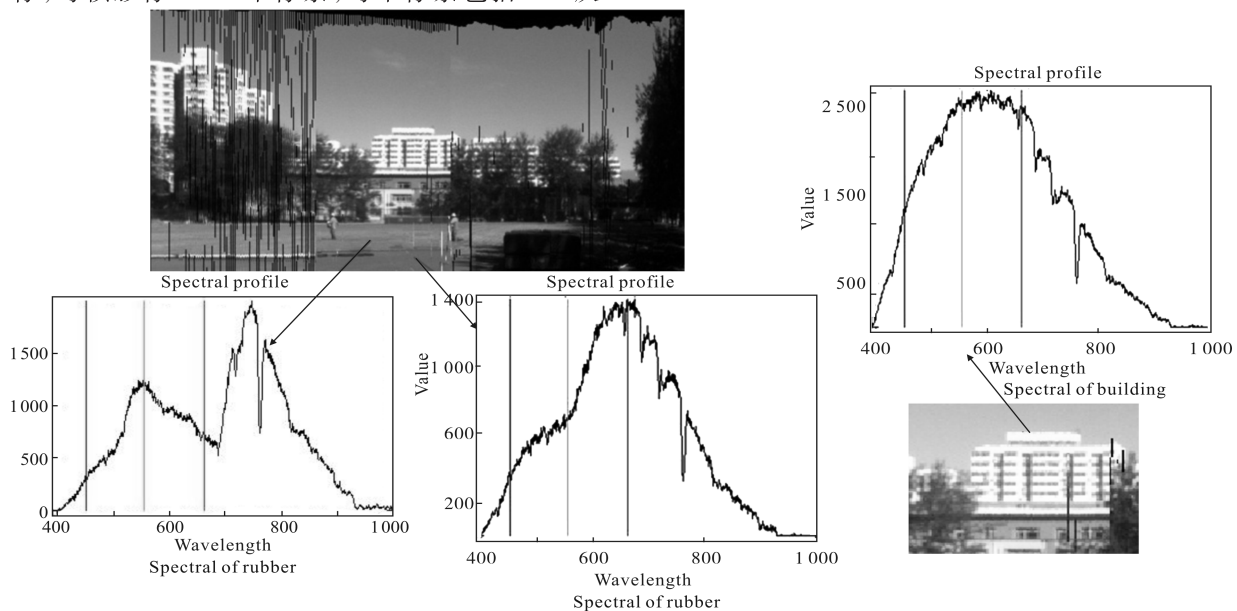


图 6 校正后影像数据及局部放大
Fig.6 Image is corrected and zoomed out

为 3.7 个像素, Z 方向的定位精度为约为 2.5 个像素。

4.2 地面推扫式成像二

2012 年 10 月, 在首都师范大学南校区东大门进行了线推扫式高光谱成像试验, 共采集影像 3 556 帧, 每帧影像包含 1600 个像素。如图 7 所示。由于小车平台是由南向北方向移动, 即对象空间的 YZ 平面投影到像平面。因此, 在几何校正时, 应根据地面模拟投影成像公式(2), 进行几何校正, 耗时 3 h。该实验主要校正了距离线推扫式传感器 40 m 的东校门作为校正对象。影像校正后, 大门保持了原有的平直性, 由于在该实验中对小车速度进行限制, 较少出现漏采现象, 但是由于采集过程中出现行人等移动对象的遮掩, 造成数据的漏采, 见图 8 中黑色的线条部分。图 9(a) 与 (b) 分别为校正后影像(图 8)中对应 A 与 B 点的波长文件, 其中, 图 9(a) 为大门建筑物波长文件, 是图 8 中对应 A 点位置的波长; 图 9(b) 为树叶波长文件, 是图 8 中对应 B 点的波长。同时, 实验选择了特征明显的 4 个角点进行精度验证, X 方向的定位精度在 2.6 个像素, Y 方向的定位精度在 3.8 个像素, Z 方向的定位精度为 2.4 个像素。



图 7 首都师范大学大学东门采集的原始影像
Fig.7 Image is collected in the front of east gate of Capital Normal University



图 8 首都师范大学东校门校正后影像
Fig.8 Image of Capital Normal University east gate after correction

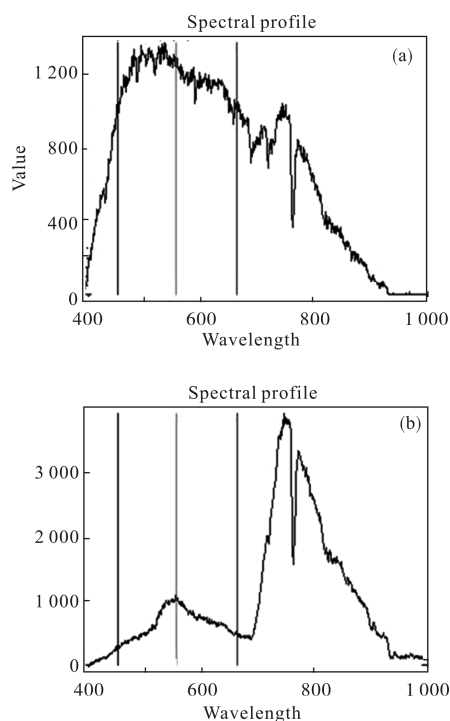


图 9 波长文件
Fig.9 Wave profile

5 结论

线推扫式高光谱侧扫成像不同于竖直对地推扫式成像, 竖直推扫成像其投影面始终为 XY 平面, 而侧扫成像模型的选择及制图坐标系的定义至关重要; 对于数据采集过程中, 必须根据侧扫成像模型详细计算影像的覆盖宽度, 同时避开行人等遮掩对象, 否则校正后会出现如图 8 中所呈现的数据漏采现象; 通过畸变影像的校正实验, 验证了算法的有效性和鲁棒性, 为线推扫式高光谱相机在地面进行侧扫成像应用, 例如文物古建筑立面光谱影像的获取、森林植被光谱影像的采集等, 提供技术支持; 对于大场景的扫描成像, 例如整条街道, 考虑到单个文件数据量的问题, 建议分段扫描, 然后进行配准。

参考文献:

- [1] Ke Gangyang, An Ning, Tian Yangchao, et al. Geometric distortion correction for Hyperspectral image using a rotation scan reflector [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(8): 2223-2227. (in Chinese)
柯刚扬, 安宁, 田扬超, 等. 旋转扫描式成像光谱仪高光谱的几何形变矫正 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(8):

- 2223-2227.
- [2] Meng Xiangang, Zhang Aiwu. A method to align POS data and linear push-broom Imaging data [C]. Lecture Notes in Electrical Engineering, Advance in automation and robotics-ICAR2011, LNEE123, pp. 96-106.
- [3] Tao CV, Hu Yong. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing [J]. *PE&RS*, 2001, 67: 1347-1357.
- [4] Zhu Shulong, Shi Wenzhong, Zhang Yan, et al. Precision comparison of several algorithms for approximate rectification of linear array push-broom imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(5): 220-226. (in Chinese)
朱述龙, 史文中, 张艳, 等. 线推扫式影像的近似几何校正算法的精度比较[J]. 遥感学报, 2004, 8(5): 220-226.
- [5] Liu Jun, Zhang Yongsheng, Wang Donghong, et al. Precise positioning of high spatial resolution satellite images based on PRC models [J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(1): 30-34. (in Chinese)
刘军, 张永生, 王冬红, 等. 基于 RPC 模型的高分辨率卫星影像精确定位[J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 30-34.
- [6] David P S, Saumeul F A. Accuracy of rectification using topographic map versus GPS ground control points [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(5): 565-570.
- [7] Wang Chunyuan, Zhang Ye, Wu Yang, et al. An ortho-rectification algorithm based on collinearity equation and polynomial error modification for remote sensing imagery[J]. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2012, 46 (12):49-54.(in Chinese)
王春媛, 张晔, 吴扬, 等. 融合共线方程和多项式修正的遥感影像正射校正 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(12): 49-54.
- [8] Changno Lee, Henry J, James S, et al. Rigorous mathematical modeling of airborne push-broom imaging system [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2000, 66(4): 385-392.
- [9] Tuo Hongya, Liu Yuncai. A two-step rectification algorithm for airborne linear images with POS data [J]. *Journal of Zhejiang University Science*, 2005, 6A(6): 492-496.
- [10] Liu Jun, Zhang Yongsheng, Wang Donghong, et al. Geometric rectification of airborne linear array pushbroom imagery supported by INS/DGPS system [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(1): 22-26. (in Chinese)
刘军, 张永生, 王冬红, 等. INS/DGPS 支持的机载线阵推扫影像几何校正[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 22-26.